

ИДИЯТУЛИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННОГО ВРАЩАТЕЛЯ
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Специальность 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы», г. Екатеринбург.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сарапулов Федор Никитич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смолин Георгий Константинович

кандидат технических наук, доцент
Шутько Виктор Федорович

Ведущая организация: ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) -
Уралэлектротяжмаш», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 01 декабря 2010 года в 14¹⁵ на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э 406

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан 28 октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.285.03
д.т.н.

Зюзов А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных экономических условиях машиностроительный комплекс и многие другие потребители продукции металлургических предприятий предъявляют высокие требования к качеству первичной составляющей своей продукции, при этом предпочтение отдается продукции с меньшей стоимостью. Решение данной проблемы особенно актуально в настоящее время, когда вопросы качества и стоимости продукции играют существенную роль, так как приходится испытывать жестокую конкуренцию со стороны зарубежных производителей. Решение данного вопроса кроется в создании высокопроизводительного электро-технологического оборудования, удовлетворяющего всем требованиям металлургического производства и в то же время обладающего минимальной стоимостью в производстве и эксплуатации.

Вот уже не одно десятилетие одним из наиболее перспективных методов плавки металлов является индукционная плавка в индукционных тигельных печах. Большой популярностью агрегат пользуется благодаря как простому обслуживанию агрегата в процессе технологического цикла, так и возможности получения металла достаточно дешевым способом. Но к качеству металла, получаемого таким способом, предъявляются все более высокие требования. И уже не раз отмечалось, что перспективным направлением развития технологии производства металлов и сплавов является применение методов силового воздействия электромагнитным полем на жидкометаллические среды. При достаточно высокой напряженности электромагнитного поля можно получить интенсивное перемешивание металла в ванне печи. Поэтому естественен интерес к электромагнитным и гидродинамическим явлениям, происходящим в жидком металле. И в свою очередь актуален вопрос создания методики расчета электромагнитных устройств, в которых силовое воздействие на жидкий металл посредством магнитного поля является основой для проведения технологического процесса. Часть этих технологий связана с применением индукционных магнитогидродинамических машин и устройств. В металлургии такие машины могут применяться для плавки, транспортировки и перемешивания жидкого металла. Актуален вопрос разработки электромагнитного «вращателя» (ЭМВ), целью которого является создание электромагнитного поля в жидкометаллическом вторичном элементе, вызывающего усилия, направленные на раскручивание расплава вокруг центральной оси ванны и деформацию поверхности зеркала расплава. Это позволяет во много раз интенсифицировать скорость химических реакций восстановления металла на границе между расплавом и шлаком, сэкономить время и электроэнергию. В настоящее время на уровне технического задания разработан многофункциональный плавильный агрегат (МПА) и определен ряд процессов, реализация которых невозможна без МПА с вращением расплава. В состав МПА входит ЭМВ, как часть основного электрооборудования, который может иметь несколько модификаций. Общий вид МПА представлен на рис. 1.

Важен и вопрос создания математической модели электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, происходящих в агрегате, поскольку, несмотря на обилие математических пакетов, наблюдается дефицит программных средств

компьютерного моделирования поля скоростей жидкого металла совместно с расчетом электромагнитного поля в индукционных печах с вращающимся расплавом.

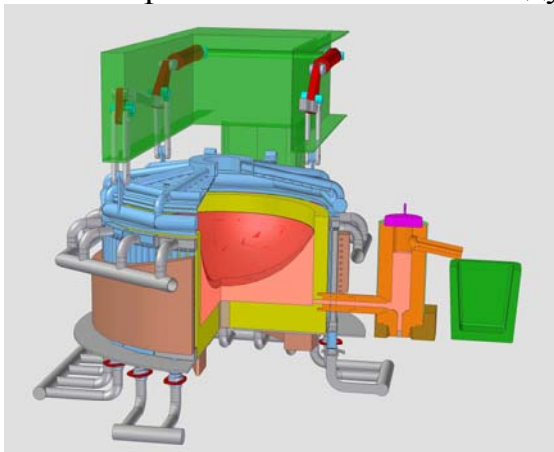


Рис. 1. Многофункциональный плавильный агрегат

Объектом исследования является специальный электромеханический преобразователь энергии (электромагнитный вращатель - ЭМВ) для создания в жидком металле вращающих электромагнитных усилий и управляемого движения металла, необходимых для проведения основного технологического процесса.

Предмет исследования: электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы в современных индукционных плавильных агрегатах.

Цель работы: исследование гидромеханических, электромагнитных и тепловых процессов в ЭМВ с помощью созданного набора средств математического моделирования, разработка рекомендаций по формированию его характеристик.

Решаемые задачи:

1. Анализ существующих индукционных установок, назначением которых является организация управляемого движения металлического расплава в рабочей зоне.
2. Построение и разработка достаточно простых и доступных математических моделей, которые могут использоваться при проектировании указанных устройств и для анализа их электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в рабочих режимах, адаптация существующих методик к конкретным конструктивным и режимным особенностям электромеханического преобразователя энергии.
3. Исследование различных модификаций индукторов вращателя и определение эффективности их применения.
4. Создание и исследование экспериментальных установок и сравнение результатов расчета с экспериментальными зависимостями.
5. Выбор практических и формулировка теоретических рекомендаций к основным техническим решениям для создания опытно-промышленного образца электромагнитного вращателя металлического расплава.

Методы исследования. В работе используются методы теории электрических и магнитных цепей, метод эквивалентных тепловых схем замещения, методы конечных разностей и конечных элементов. Основной ряд задач реализован в пакете MathCAD14 с помощью алгоритмов, позволяющих провести расчет всех параметров в одном формуляре. Используются методы компьютерного моделирования с помощью пакета COMSOL Multiphysics, предназначенного для анализа полевых задач. Используются также физические методы исследования с применением лабораторных установок.

Научную новизну представляют математическая модель взаимосвязанных электромеханических и тепловых процессов на основе детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения, а также гидродинамических процессов

с помощью МКР, результаты анализа указанных процессов и рекомендации по выбору режимов работы ЭМВ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Создана программа для расчета взаимосвязанных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в плавильном агрегате (ПА) с вращающимся расплавом. Кроме того, программа может быть использована для оценки гидромеханических переходных процессов в расплаве при пуске или реверсе и для оценки тепловых переходных процессов в ЭМВ.

Приведены технические решения и результаты расчетов, которые могут быть использованы при проектировании ЭМВ.

Созданы лабораторные модели ЭМВ для проверки адекватности и корректности представленной математической модели.

Реализация

1. Результаты исследования электромагнитных, тепловых и гидромеханических процессов в расплаве ПА и в ЭМВ переданы ЗАО «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург).
2. Результаты работы используются на кафедре электротехники и электротехнологических систем УрФУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании, при проведении научных исследований и проведении лабораторных работ.
3. Диссертационная работа подготовлена в рамках целевой программы министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)» «Разработка, технологическое и электрофизическое обоснование процессов получения высоколегированных сплавов (в том числе с упрочняющей нанокристаллической структурой) при интенсификации перемешивания в агрегате с вращением шлака и металла».

Апробация. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных мероприятиях:

Konferencyjne «VI Lubuska konferencja naukowo-techniczna Innowacyjne Materiały I Technologie w Elektrotechnice – i-MITEL 2010», Przylęsko k. Gorzowa Wielkopolskiego, 2010;

Международные научно-технические конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». Севастополь, 2010, 2007;

XIII, XII Международные конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым, Алушта, 2010, 2008;

14-ая Международная плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям, Плес, Россия, 2010;

Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2009), Новосибирск, НГТУ, 2009;

IV научно-техническая конференция с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», Новосибирск, НГТУ, 2009;

Международная научная конференция «Электронная культура. Информационные технологии будущего и современное электронное обучение «MODERN IT & (E-) LEARNING», Астрахань, 2009;

VIII-я, IX-я научно-практические конференции с международным участием «Проблемы и достижения в промышленной энергетике», Екатеринбург, 2007, 2008;

THE 3rd INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES, IFOST – 2008. Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) - Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia), 2008;

Российско-британский семинар молодых ученых и студентов «ЭКОТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА: ЭКОТЕХ – XXI» Проект Британского Совета. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007;

III Международная НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007;

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 22 печатных работы, из них 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора состоит в разработке алгоритмов расчета и адаптации метода ДСЗ и МКР для расчета параметров индукционного устройства с вращающимся расплавом в активной зоне; проектировании и изготовлении лабораторных моделей ЭМВ для проведения экспериментов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 6 приложений. Общий объем 209 страниц. Основная часть изложена на 168 страницах машинописного текста, иллюстрирована 83 рисунками, 12 таблицами. Список использованной литературы содержит 102 наименования на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена и обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цели работы и задачи, необходимые для их достижения, отмечена научная новизна, практическая ценность результатов исследования, приведена структура диссертации и апробация работы.

В первой главе приведен обзор литературных источников и рассмотрены известные устройства для формирования МГД процессов в металлическом расплаве. На основании анализа отечественных и зарубежных публикаций показано состояние разработки ЭМВ различного назначения, представлены известные конструкции устройств для создания вращательного движения расплава в плавильных агрегатах. Сформулированы основные требования к разрабатываемому ЭМВ: устранение мениска от действия нагревающего индуктора; создание лунки глубиной не менее 50 см с помощью ЭМВ; частичный подогрев загрузки с помощью ЭМВ; исключение перегрева нагревающего и вращающего индукторов; увеличение активной поверхности взаимодействия между основным металлом и шлаком; выравнивание температуры по всему объему расплава.

Описаны известные методы электромагнитного расчета электромеханических преобразователей энергии, выделены особенности, отличающие каждый метод от других.

Приведены основные методы расчета турбулентного движения расплава в ванне ПА. Описаны основные способы упрощения решения уравнения Навье-Стокса.

Приведены известные методы теплового расчета электрических машин, описан метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС), используемый для анализа тепловых процессов в ЭМВ.

Описаны и приведены эскизные решения конструкций разрабатываемых ПА, в состав которых входит ЭМВ (рис.2).

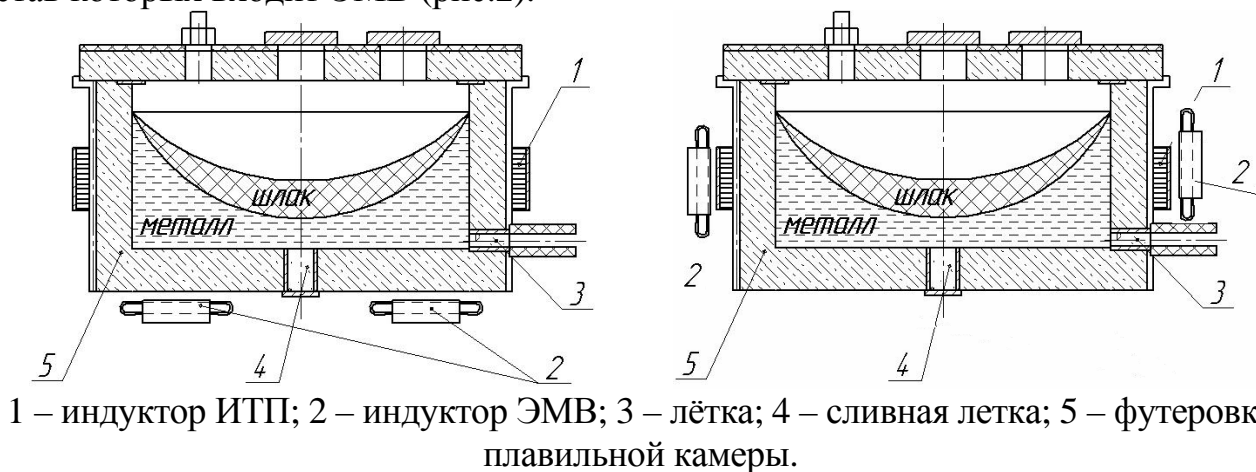


Рис.2. Компонентные схемы многофункционального плавильного агрегата

Обозначены основные достоинства ведения плавки оксидосодержащей шихты с вращением расплава:

1. Увеличивается скорость плавки и скорость восстановления металлов за счет большей площади соприкосновения шлака и металла в лунке.
2. Улучшается разделение фаз, что облегчает очистку металлической фазы от оксидных включений.
3. Исключается контакт шлаковой фазы со стенками плавильной камеры в результате образования лунки параболической формы, снижается агрессивное воздействие шлака на футеровку.

Вторая глава посвящена разработке математической модели взаимосвязанных электромагнитных и гидродинамических процессов в расплаве, а также с учетом расчета теплового состояния индуктора ЭМВ. Блок-схема расчета представлена на рис.3. Сложность полной математической модели МПА заключается в том, что она должна учитывать электромагнитные усилия, действующие на ВЭ как со стороны ЭМВ, так и со стороны индуктора ИТП. Поэтому при моделировании электромагнитных и гидромеханических процессов проведена декомпозиция общей модели таким образом, что силовые воздействия со стороны индуктора ЭМВ и индуктора ИТП рассматриваются независимо друг от друга. Если МПА оснащен ЭМВ и греющим индуктором ИТП, на единичный объем будет действовать ряд сил, рис.4а – с торцевым ЭМВ, рис.4б – с боковым ЭМВ.

Действует сила тяжести – $F_{тяж}$, единственная сила, существующая независимо от того, присутствуют ли электромагнитные усилия. Со стороны торцевого ЭМВ действуют: сила вращения – $F_{вр.эмв}$, усилия электромагнитного отталкивания (сила левитации) – $F_{отт.эмв.торц}$. Т.к. расплав совершает вращательное движение, на него действует центробежная сила – $F_{цб.эмв}$. Под действием $F_{цб.эмв}$ металл у стенок тигля поднимается, образуя лунку. Силу поднятия металла у стенок, обусловленную вращением, обозначаем $F_{под.цб.эмв}$. Со стороны индуктора ИТП действуют силы отталкивания от боковых стенок – $F_{отт.умп}$. При питании индуктора ИТП трехфазной систе-

мой токов с направлением бегущего магнитного поля от пода вверх вдоль стенки тигля на расплав действует $F_{тяг.итп}$.

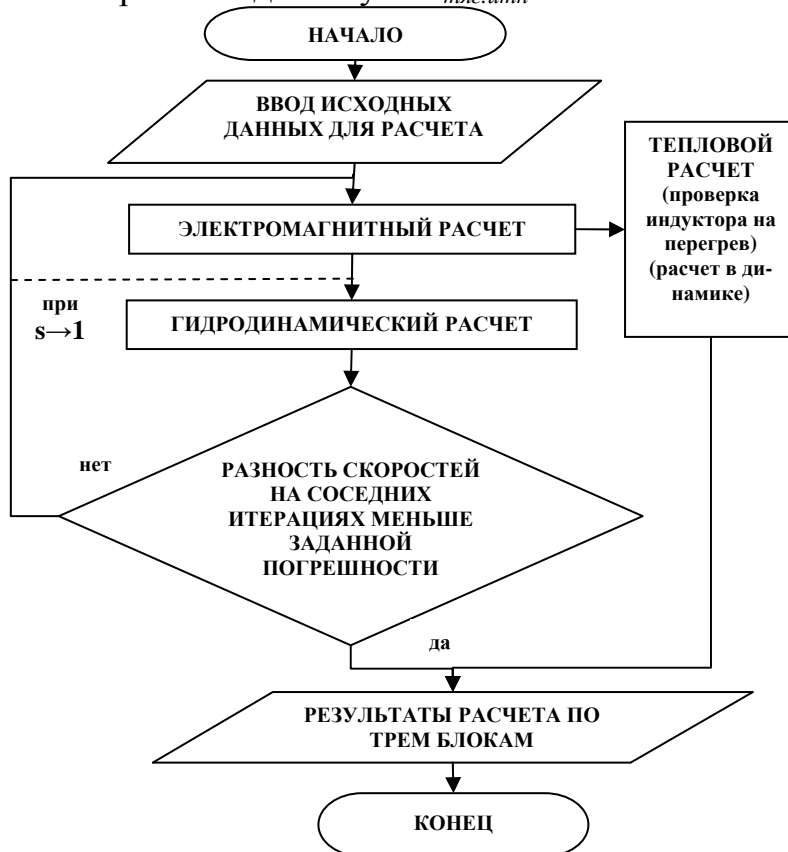


Рис.3. Блок схема ЭМВ

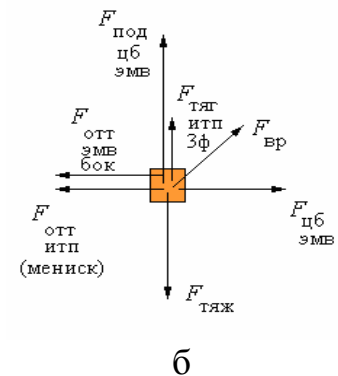
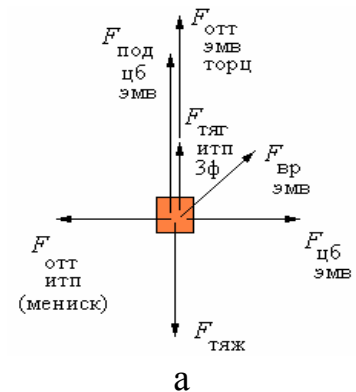


Рис.4. Направления векторов усилий, действующих на расплав.

Полагая, что в установившемся режиме равнодействующая всех внешних сил, приложенных к произвольному объему жидкости, равна нулю, всеми силами, кроме сил вязкого трения и сил вращения пренебрегаем. После расчета и формирования поля скоростей от каждого индуктора выполняем операцию наложения результатов и получаем общую картину движения расплава в рабочей камере МПА. Форму свободной поверхности расплава корректируем методом последовательных приближений в интерактивном режиме, т.е. алгоритм расчета предполагает итерационные процедуры. Поэтому блок-схема имеет циклическую структуру, определяющим параметром является скорость вращения расплава на соседних итерациях.

Электромагнитная модель основана на методе детализированных магнитных схем замещения (ДМСЗ). Структура математической модели индукционного устройства на основе схем замещения включает три блока уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа для многоконтурной электрической цепи индуктора, многоконтурной короткозамкнутой электрической цепи ВЭ и многослойной магнитной цепи (рис. 5).

Для установившегося режима работы они записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} (U_1) &= (Z_1)(I_1) - (K_{E1})(\Phi), \\ (K_{E2})(\Phi) &= (Z_2)(I_2), \\ (K_{F1})(I_1) + (K_{F2})(I_2) &= (R)(\Phi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $(U_1), (I_1), (I_2)$ – векторы комплексных значений напряжений и токов фаз, (Φ) – вектор комплексных значений потоков взаимоиндукции.

Параметры цепей характеризуются матричными сопротивлениями $(Z_1), (Z_2)$ и (R) . Матрицы $(K_{E1}), (K_{E2})$ и $(K_{F1}), (K_{F2})$ характеризуют схемы соединения и раскладки по пазам секций (стержней) обмоток индуктора и ВЭ. Они формируют соответственно ЭДС фаз обмоток и пазовые МДС индуктора и ВЭ, связывая электрические цепи с магнитной. Для электрических контуров ВЭ уравнения Кирхгофа записываются в неподвижной системе координат с учетом индуцированных трансформаторных ЭДС и ЭДС движения, что отражается в структуре и элементах матрицы (K_{E2}) .

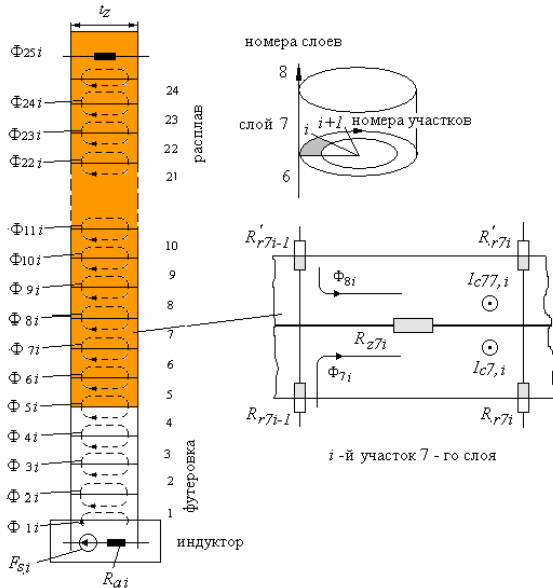


Рис. 5. Фрагмент детализированной схемы замещения магнитной цепи

Рассчитываются нормальные и тангенциальные магнитные сопротивления участков слоев (2), а также их электрические проводимости (3).

$$R_{nn}^{abc} = \frac{1}{\mu_0 \mu_n t_z \cdot B_i} \frac{h_n}{}, \quad R_{mn}^{abc} = \frac{1}{\mu_0 \mu_n t_z} \frac{t_z}{h_n L_t} \quad (2)$$

$$g_n = \gamma_n^{\text{относ}} \cdot \frac{\gamma_{se} t_z h_n}{2B_i}, \quad (3)$$

Для схемы (рис. 5) при числе слоев Q_z записываются матричные уравнения магнитного равновесия

$$\begin{cases} (Z_{01})(\Phi_1) - (\Phi_2) = (R_1^{-1})(F_{0s}), \\ \dots \\ -(r_3)(\Phi_2) + (Z_{03})(\Phi_3) - (\Phi_4) = 0, \\ \dots \\ (R_Q)(\Phi_Q) + (Z_{Q+1})(\Phi_{Q+1}) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $(r_n) = (R_n^{-1})(R_{n-1})$ для $n = 2 \dots Q$ и $(Z_{0n}) = (R_n^{-1})(Z_n)$ для $n = 1 \dots Q$. (F_{0s}) – вектор МДС пазов индуктора.

Сердечник индуктора сводится к гладкому введением коэффициента Картера в эквивалентный зазор, в краевых зонах вводятся магнитные сопротивления ярма, отличные от активной зоны, область моделирования разбивается на участки шириной t_z по продольной координате x и на k слоев по нормальной координате y . Фрагмент детализированной магнитной схемы замещения плоской ЛИМ приведен на рис. 5 и содержит Q участков шириной t_z . Модель имеет Qz слоев с различными значениями удельной электропроводности, толщины, а также нормальной и тангенциальной магнитной проницаемости: $\gamma_n, h_n, \mu n$ и μt_n .

Выполняется следующий алгоритм исключения потоков из (4), начиная с первого уравнения:

$$(\Phi_n) = (a_n)(F_{0s}) + (b_n)(\Phi_1) \text{ для } n = 2 \dots Q, \quad (5)$$

где $(a_n) = (Z_{0n-1})(a_{n-1}) - (r_{n-1})(a_{n-2})$; $(b_n) = (Z_{0n-1})(b_{n-1}) - (r_{n-1})(b_{n-2})$ для $n = 4 \dots Q$.

Предполагая, что число слоев $Q_Z = N$, записываем уравнение для $(N+1)$ (экранирующего) слоя, принимая $(\Phi_{N+1}) = 0$,

$$(\Phi_{N+1}) = (a_{N+1})(F_{0s}) + (b_{N+1})(\Phi_1), \quad (6)$$

где $(a_{26}) = (Z_{25})(a_{25}) - (R_{24})(a_{24})$; $(b_{26}) = (Z_{25})(b_{25}) - (R_{24})(b_{24})$.

Из (6) получаем вектор контурных потоков первого слоя

$$(\Phi_1) = (b_{Q_Z+1}^{-1})(a_{Q_Z+1})(F_{0s}) \quad (7)$$

и далее векторы потоков нормальных и тангенциальных индукций слоев, а также плотностей токов и удельных усилий в загрузке.

Гидродинамическая модель ЭМВ базируется на уравнении Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + (\vec{w} \nabla) \vec{w} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{w} + F \quad (8)$$

$$\text{div} \vec{w} = 0, \quad (9)$$

где $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ - коэффициент кинематической вязкости, η - коэффициент динамической вязкости, ρ - плотность, P - давление.

Запишем уравнение (8) с учетом (9) в цилиндрической системе координат отдельно для окружной компоненты скорости расплава w в установившемся режиме работы при действии только вращающих электромагнитных сил. Учтем при этом, что $\nabla P = 0$, а скорость вдоль окружной координаты неизменна (10).

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = -\frac{F_{ud}}{\eta_t}, \quad (10)$$

Решается (10) с помощью МКР. Расчетная область продольного сечения расплава разбивается с помощью конечно-разностной сетки с различными шагами по радиальной h_r и осевой h_z координатам (рис.6). Усилия вводятся в расчет из электромагнитного блока модели. Считаем, что скорость внутри каждого кольца одинакова по его объёму и отличается от скорости соседнего кольца. Между кольцами возникают силы трения, которые учитываются с помощью коэффициентов вязкости.

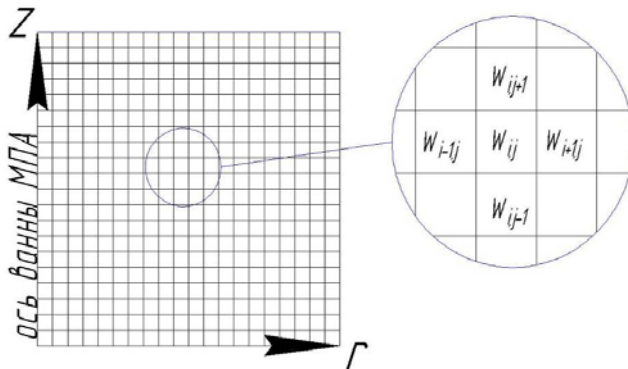


Рис. 6. Конечно-разностная сетка

После записи (10) в конечно-разностной форме это уравнение приобретает вид уравнения Пуассона для i, j -го узла (11). Проведенные исследования показали, что в рассматриваемой задаче можно достичь удовлетворительных результатов, если значение η_t задать одинаковым по всему продольному сечению тигля и соответствующим наибольшей скорости расплава.

$$w_{i+1,j} \cdot \left(1 + \frac{h_r}{2 \cdot r_{i,j}}\right) + w_{i-1,j} \cdot \left(1 - \frac{h_r}{2 \cdot r_{i,j}}\right) + w_{i,j+1} \cdot \frac{h_r^2}{h_z^2} + w_{i,j-1} \cdot \frac{h_r^2}{h_z^2} - w_{i,j} \cdot \left(2 + 2 \cdot \frac{h_r^2}{h_z^2} + \frac{h_r^2}{r_{i,j}^2}\right) = - \frac{F_{ring} \cdot h_r^2}{\eta_l \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{i,j} \cdot h_r \cdot h_z} \quad (11)$$

Такая запись уравнения удобна при расчете уравнения в среде MathCad, поскольку задание исходных данных происходит в матричной форме, где элементы матриц являются коэффициентами уравнения Пуассона для каждого узла конечно-разностной сетки.

Анализ теплового состояния ЭМВ, производим с помощью метода детализированных ЭТС. Считаем температуру ВЭ заданной и постоянной по всему объему. При моделировании тепловых процессов выделяем 5 тепловых масс: ВЭ – расплавленный металл, сталь индуктора, медь пазовой части обмотки, медь лобовых частей обмотки и футеровка (немагнитный зазор между индуктором и ВЭ полностью занят футеровкой). На рис. 7 показан эскиз ЭМВ и приведена эквивалентная тепловая схема устройства, которая описывается системой уравнений (12).

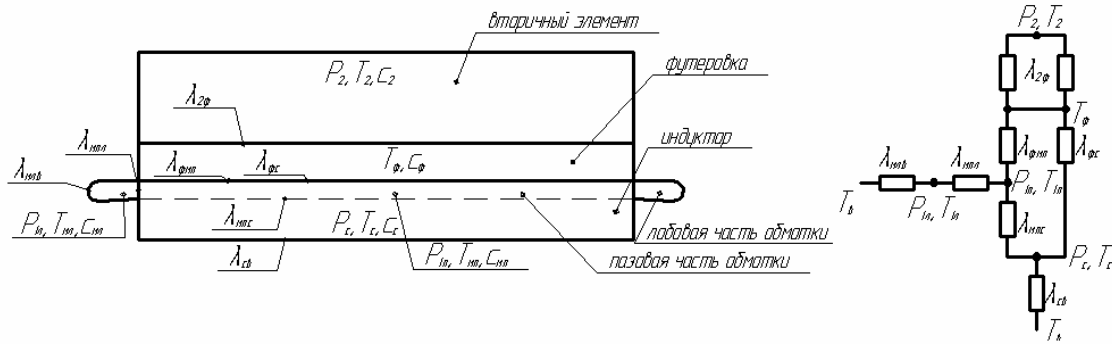


Рис.7. Эквивалентная тепловая схема ЭМВ

Начальная температура ВЭ задается равной температуре расплава в момент, когда необходимо включать ЭМВ, например 1500 °С.

$$\begin{cases} c_c \cdot M_c \frac{dT_c}{dt} = -(\lambda_{mc} + \lambda_{cv}) \cdot T_c + \lambda_{cv} T_v + \lambda_{mnc} T_{1n} + P_c, \\ c_{1n} \cdot M_{1n} \frac{dT_{1n}}{dt} = -(\lambda_{mnl} + \lambda_{fml} + \lambda_{mnc}) \cdot T_{1n} + \lambda_{fml} T_f + \lambda_{mnl} T_{1l} + \lambda_{mnc} T_c + P_{1n}, \\ c_{1l} \cdot M_{1l} \frac{dT_{1l}}{dt} = -(\lambda_{mlv} + \lambda_{mnl}) \cdot T_{1l} + \lambda_{mlv} T_v + \lambda_{mnl} T_{1n} + P_{1l}, \\ c_f \cdot M_f \frac{dT_f}{dt} = -(\lambda_f + \lambda_{fml} + \lambda_{fc}) \cdot T_f + \lambda_f T_2 + \lambda_{fml} T_{1n} + \lambda_{fc} T_c, \\ c_2 \cdot M_2 \frac{dT_2}{dt} = -\lambda_f T_2 + \lambda_f T_f + P_2. \end{cases} \quad (12)$$

Электромагнитная модель бокового ЭМВ также основана на методе ДМСЗ. Отличительной особенностью является то, что при расчете цилиндрической конструкции ЭМВ с вращающимся электромагнитным полем расчет производится с учетом его осевой симметрии. Расчетная область при этом разбивается на цилиндрические слои высотой, равной ширине индуктора, толщина цилиндрической стенки

равна толщине слоя (рис.8). Задаются матрицы-столбцы внешних радиусов слоев, относительных магнитных проницаемостей поперек и вдоль каждого слоя, относительных удельных электропроводностей слоев. На основании этого рассчитываются толщины и средние радиусы слоев и параметры схемы замещения, контуры которой

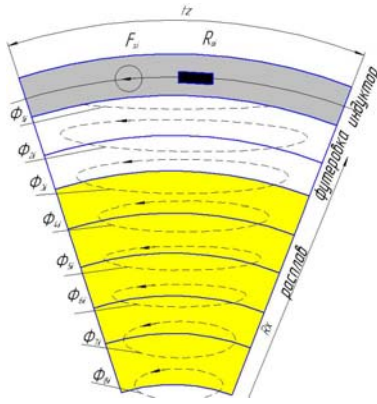


Рис. 8. Фрагмент ДМСЗ для ЦЛИМ

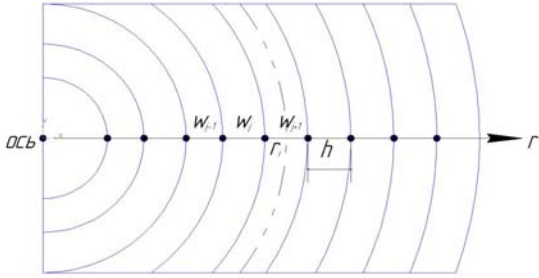


Рис. 9. Одномерная конечно-разностная сетка

гидромеханического расчета и вводятся в условие задачи.

$$w_i \cdot \left(2 + \frac{h^2}{r_i^2} \right) - w_{i+1} \cdot \left(1 + \frac{h}{2r_i} \right) - w_{i-1} \cdot \left(1 - \frac{h}{2r_i} \right) = \frac{F_{ring} \cdot h}{2\pi \cdot r_i \cdot h_z \cdot \eta_t}, \quad (13)$$

При оценке тепловых процессов, происходящих в боковом ЭМВ, используем рассмотренную выше детализированную ЭТС. Изменяются лишь численные значения тепловых проводимостей между тепловыми массами ЭТС.

В результате расчета поля скоростей определяем высоту лунки. Для этого рассмотрим равновесие жидкости, покоящейся относительно сосуда, равномерно вращающегося вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω (рис.10). Найдем потенциал силового поля как алгебраическую сумму потенциалов поля тяжести и поля центробежной силы - $dp = \omega^2 \cdot r dr - g dz$.

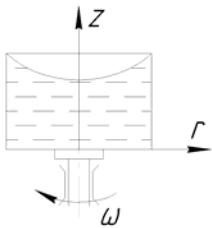


Рис. 10. Высота лунки металла

После интегрирования уравнение примет вид (14)

$$p = \frac{\rho \omega^2}{2} \cdot r^2 - \rho g z + C \quad (14)$$

Произвольную постоянную определим из условия: $z = z_0 = 0$, $r_0 = 0$, $p = p_0 = 0$, $C=0$. Высоту лунки определим исходя из условия, что давление на поверхности ванны от центробежной силы уравновешивается гидростатическим давлением

жидкости. В результате получим

$$h_{мет} = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} = \frac{v^2}{2g}, \quad (15)$$

Траектория лунки рассчитывается как набор точек, указывающих высоту каждого расчетного объема. Построив кривую, соединяющую все точки, и аппроксимировав ее, получим форму лунки и высоту металла. Если ввести дополнительное слагаемое $F_{осев}$ - удельное погонное усилие, действующее на расплав со стороны греющего индуктора, имеющее размерность давления, то высоту лунки можно определить по (16).

$$h_{мет} = \frac{v^2}{2g} + \frac{F_{осев}}{\rho g}. \quad (16)$$

Предложена методика для оценки динамических режимов разгона и торможения ВЭ, а также способ повышения точности расчета с использованием формул четвертого порядка при замене производных по координате конечно-разностными аналогами.

В третьей главе отражены особенности построения компьютерной модели ЭМВ. Программа для расчета характеристик ЭМВ построена таким образом, что выполнение вычислений по отдельным блокам происходит в едином теле формуляра, в этом заключается ее достоинство. При этом компьютерная реализация для расчета торцевой и боковой конструкций ЭМВ не имеет принципиальных отличий. Программа реализована в среде MathCad14, текст записан понятным математическим языком. Сама модель совместно со средой программирования позволяет при заданных геометрических параметрах устройства определить электрические и магнитные сопротивления, получить картину поля, распределения токов, индукций и усилий по участкам расчетной области. Для верификации полученных результатов использовались лицензионные и авторские программы, основанные на МКР и МКЭ.

Расчет гидродинамической задачи основан на релаксационном методе решения уравнения в частных производных по методу Гаусса – Зейделя с помощью встроенной процедуры MathCAD *relax*. Результатом является квадратная матрица скоростей, которая является решением уравнения Пуассона.

Тепловой расчет основан на решении системы ДУ в пакете MathCad с помощью встроенной функции *rkfixed*. Система решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом. Результатом решения является матрица с количеством строк, равным $(n+1)$, и числом столбцов, равным количеству переменных плюс один столбец, в который записаны моменты времени. В оставшихся столбцах выводятся значения температур в соответствующий промежуток времени для каждой тепловой массы в отдельном столбце. Первая строка содержит начальные значения температур в момент времени, равный нулю. Согласно полученным данным строятся графики изменения температуры соответствующих тепловых масс с течением времени.

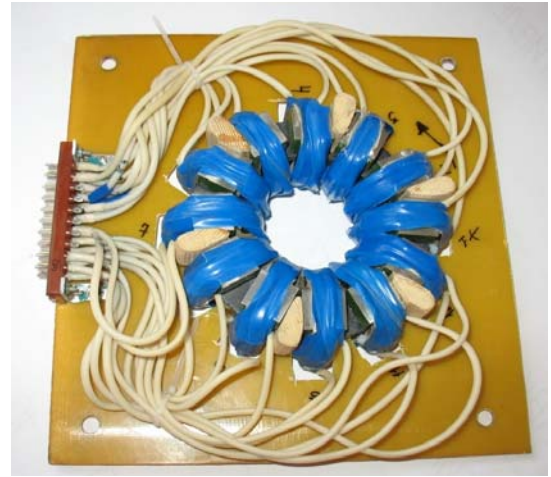
В программе реализован расчет затрат материалов на создание действующего агрегата, исходя из геометрии ЭМВ и свойств используемых материалов.

Скорость расчета в среднем составляет от одной до трех минут.

В четвертой главе представлены результаты математического и физического моделирования ЭМВ торцевого типа. Для оценки адекватности и достоверности математической модели, построенной на основе метода ДСЗ и МКР, были изготовлены 2 модели торцевого ЭМВ: с барабанными (рис.11а) и кольцевыми обмотками (рис.11б).



а



б

Рис. 11. Экспериментальные модели ЭМВ

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе проводились измерения индукции электромагнитного поля над поверхностью индуктора на различных высотах. На втором этапе при тех же параметрах проводились замеры скорости движения ВЭ, высота образовавшейся лунки, после чего был проведен тепловой эксперимент на холостом ходу, замерялись температуры обмотки и магнитопровода индуктора. Проводились замеры интегральных параметров установки: тока, напряжения, активной мощности установки (табл. 1).

Интегральные параметры ЭМВ

Таблица 1

Экспериментальные данные	Расчетные значения
$I_{f_A} = 2A, U_{f_A} = 65B, P_A = 75Bm.$ $I_{f_B} = 2,25A, U_{f_B} = 60B, P_B = 70Bm.$ $I_{f_C} = 2A, U_{f_C} = 62B, P_C = 65Bm.$	$I_{f_A} = 2A, U_{f_A} = 50,5B, P_A = 84,3Bm$ $I_{f_B} = 2A, U_{f_B} = 50,5B, P_B = 84,3Bm$ $I_{f_C} = 2A, U_{f_C} = 50,5B, P_C = 84,3Bm$
$I_{f_A} = 3A, U_{f_A} = 103B, P_A = 225Bm.$ $I_{f_B} = 3,35A, U_{f_B} = 97B, P_B = 225Bm.$ $I_{f_C} = 3A, U_{f_C} = 98B, P_C = 200Bm.$	$I_{f_A} = 3A, U_{f_A} = 75.7B, P_A = 190Bm.$ $I_{f_B} = 3A, U_{f_B} = 75.7B, P_B = 190Bm.$ $I_{f_C} = 3A, U_{f_C} = 75.7B, P_C = 190Bm.$
$I_{f_A} = 3,5A, U_{f_A} = 117B, P_A = 300Bm.$ $I_{f_B} = 4A, U_{f_B} = 110B, P_B = 300Bm.$ $I_{f_C} = 3,5A, U_{f_C} = 110B, P_C = 250Bm.$	$I_{f_A} = 4A, U_{f_A} = 101B, P_A = 337Bm.$ $I_{f_B} = 4A, U_{f_B} = 101B, P_B = 337Bm.$ $I_{f_C} = 4A, U_{f_C} = 101B, P_C = 337Bm.$

Видно, что максимальное расхождение в расчетных и экспериментальных значениях напряжения составило около 26 % при токе индуктора 4 А. Такое расхождение можно объяснить приближенным учетом падений напряжений в лобовых частях обмотки при расчете.

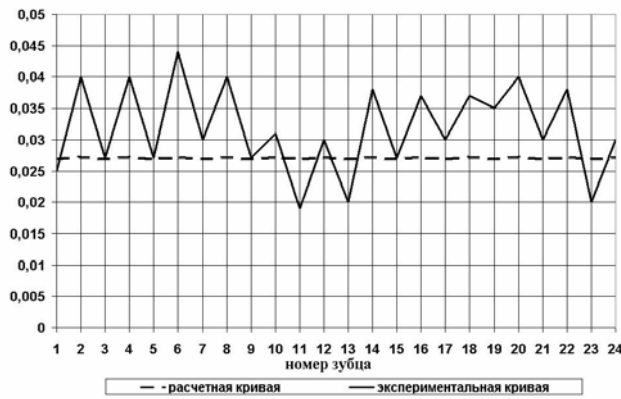


Рис. 12. Распределение индукции на поверхности индуктора

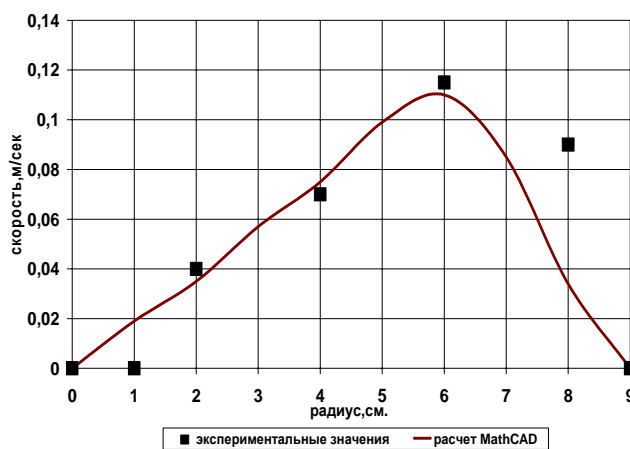


Рис. 13. Распределение скорости по радиусу на поверхности металла

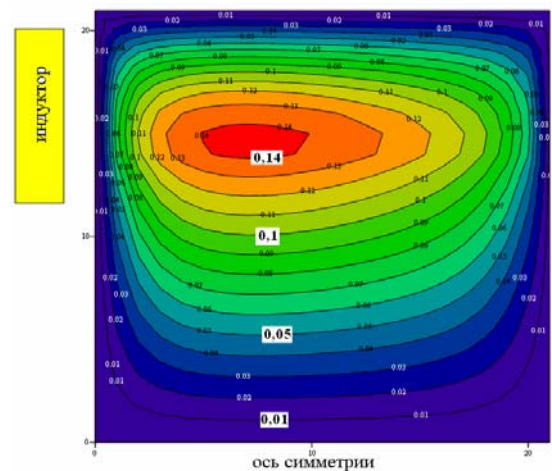


Рис. 14. Распределение скорости в продольном сечении ванны

Видно, что характер и значения скорости в вычислительном и физическом экспериментах практически совпадают. Распределение скорости по радиусу ванны расплавленного металла представлено на рис. 14. Результат выводится в виде двумерного графика линий уровня в продольном сечении ванны, полученного поля скоростей. Видно, что максимальная скорость расплава наблюдается в глубине металла, ближе к индуктору. На рис. 13 вынесена кривая скорости на поверхности ванны для сравнения с экспериментом. Выбросы в некоторых точках (рис. 13) объясняются сложным характером движения расплава и погрешностью измерений, что вызывает локальные отклонения от усредненного значения скорости.

Использование ЭМВ с кольцевыми обмотками позволяет исследовать широкий набор схем соединений. Для данной конструкции на рис. 15 изображено расчетное и экспериментальное распределение скорости по радиусу на поверхности металла. Расчет проведен с использованием предложенной методики на основе метода ДСЗ и МКР в среде MathCAD, и с применением лицензионного пакета Comsol Multiphysics в трехмерной постановке (справа рис. 15). По графикам видно достаточно близкое расположение кривых, при этом максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 30 % для наибольших скоростей, что в значительной степени объясняется несовершенством системы измерения скорости с помощью поплавков.

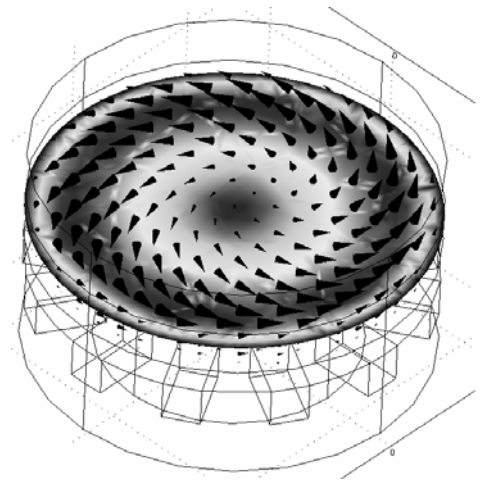
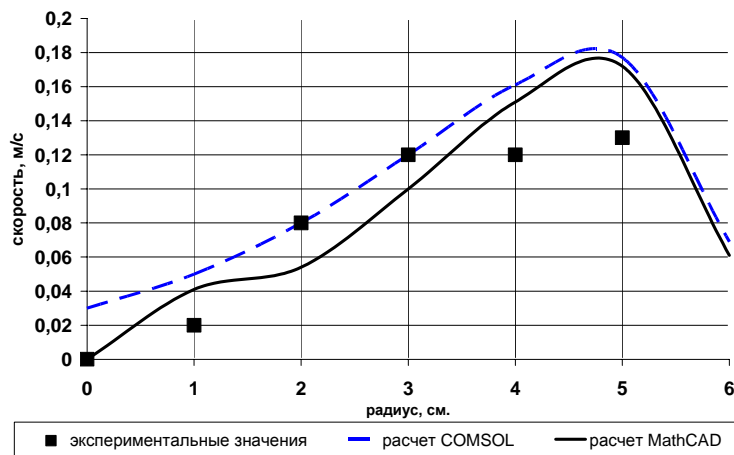


Рис. 15. Распределение скорости по радиусу на поверхности металла

Достаточно хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом свидетельствует об адекватности предложенных моделей и дает основания полагать, что допущения, принятые при анализе ЭМВ с помощью модели на основе метода ДСЗ и МКР, приемлемы для получения достаточной для инженерной практики точности, а также подтверждает достоверность теоретических выводов. Полевые расчеты применялись ограниченно для проверки и уточнения процессов, происходящих в жидком металле, ввиду недостатка экспериментальных данных, связанных с трудностями измерения скорости движения расплава в глубинных слоях.

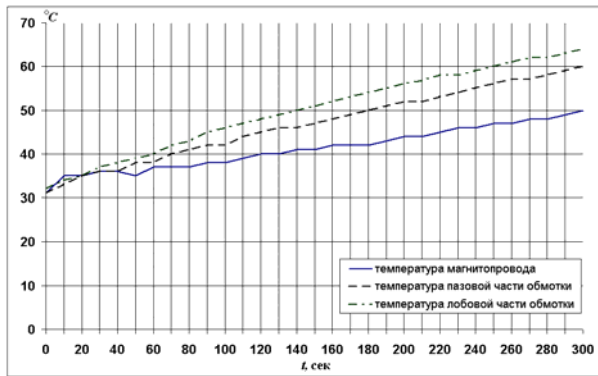
В ходе экспериментов показана принципиальная возможность образования лунки параболической формы при воздействии на расплав вращающимся электромагнитным полем. В табл. 2 приведены данные измерения высоты лунки в зависимости от величины тока для лабораторного ЭМВ с барабанными обмотками. Высота металла в спокойном состоянии $h=1,8$ см.

Таблица 2.

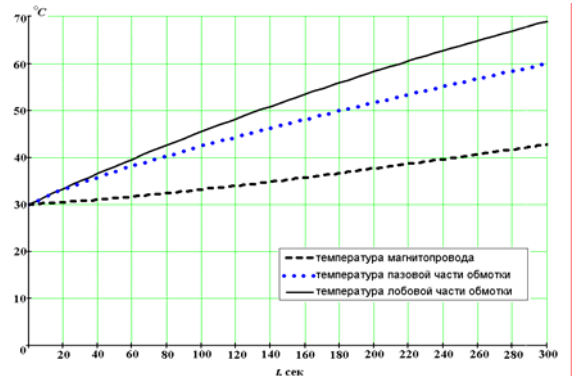
Ток индуктора	Высота металла в различных точках по радиусу ванны металла
$I = 2$ А	Высота лунки $h_R = 2,3$ см, $h_{R/2} = 2$ см, $h_0 = 1,3$ см
$I = 3$ А	Высота лунки $h_R = 2,7$ см, $h_{R/2} = 2,2$ см, $h_0 = 0,9$ см
$I = 4$ А	Высота лунки $h_R = 3$ см, $h_{R/2} = 2$ см, $h_0 = 1$ см
где: R – у боковой стенки, $R/2$ – по среднему радиусу, 0 – на оси ванны.	

В главе приведены результаты теплового эксперимента и их сравнение с расчетными данными. На рис. 16 представлены результаты теплового эксперимента для конструкции ЭМВ рис. 11а.

В ходе физического эксперимента была достигнута температура обмотки индуктора в 120°C . Время нагрева составило 2420 сек. При этом температура лобовых частей обмотки - 120°C , температура пазовой части обмотки - 120°C , температура магнитопровода - 110°C . В результате вычислительного эксперимента максимальная температура наблюдается в пазовой части обмотки через 3000 секунд после начала нагрева. Температура лобовой части обмотки равна 106°C , температура пазовой части - 110°C , температура магнитопровода - 100°C . Расхождение с экспериментом составляет 8-11%.



а)



б)

Рис. 16. Кривые нагрева частей ЭМВ (а – физический эксперимент, б - вычислительный эксперимент)

В пятой главе представлены результаты исследований электромагнитных и гидромеханических характеристик основных конструкций ЭМВ: торцевого ЭМВ (рис. 17) и бокового ЭМВ (рис. 18) (табл.3).

Доказана корректность предложенной «быстрой» модели на основе ДСЗ и МКР в MathCAD путем сравнения результатов с расчетом в полевом пакете Comsol Multiphysics. Проведены вычислительные эксперименты каждого варианта конструкции в диапазоне частот 5-20 Гц с шагом 5 Гц. Плотность тока в проводе обмотки индуктора задавалась во всех случаях одинаковой – 4.5 А/мм^2 . Вычислительный эксперимент подтвердил, что использование низких частот для силового воздействия на жидкие металлы более эффективно.

Таблица 3

Основные параметры ЭМВ торцевого типа					Основные параметры ЭМВ бокового типа				
Число пар полюсов \ Параметр	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$	Число пар полюсов \ Параметр	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$
Внешний радиус индуктора 1000 мм					Внутренний радиус индуктора 1250 мм				
Ширина индуктора 400 мм.					Высота индуктора 1000 /260 мм				
Высота паза 150мм.					Высота паза 150мм				
Ширина паза, мм.	300	300	100	150	Ширина паза, мм.	262	98	131	98
Ширина зубца, мм.	120	120	40	60	Ширина зубца, мм.	175	65	87	65
Число пазов	12	12	36	24	Число пазов	18	48	36	48
Число пазов на полюс-фазу	2	1	3	1	Число пазов на полюс-фазу	3	4	2	2
Полюсное деление, мм.	2520	1260	840	630	Полюсное деление, мм.	3927	1963	1300	982

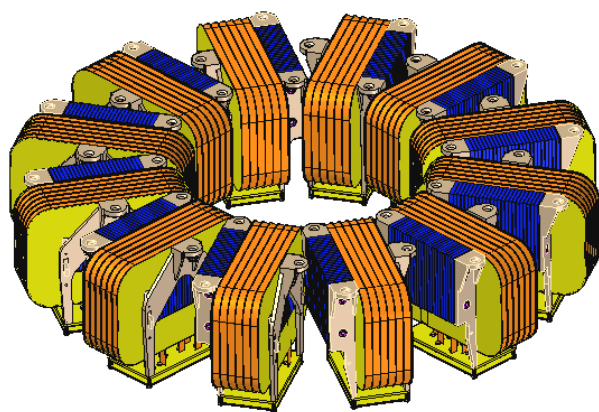


Рис. 17 Торцевой ЭМВ

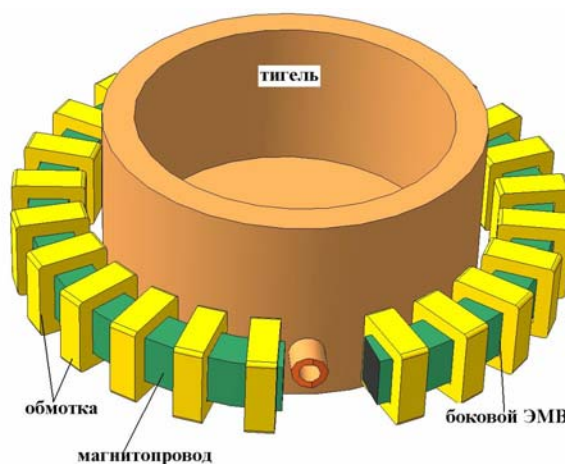


Рис. 18 Боковой ЭМВ

При частоте питающего тока 5 Гц наблюдаются максимальные значения скоростей движения расплава и тяговых усилий для исследуемых конструкций ЭМВ. В табл. 3 и 4 представлены результаты исследований ЭМВ торцевого и бокового типа на частоте 5 Гц.

Результаты исследования ЭМВ торцевого исполнения с высотой металла в тигле 0,3 м

Таблица 4.

Число пар полюсов	Частота, Гц	Мощность (полная/эл.магн), кВА	Потери в индукторе, кВт	Мощность во ВЭ, кВт	cosφ	Суммарное тяговое усилие, кН	Макс. скорость м/с
1	5	474,1+3434j/315+1100j	159,1	315	0,137	11,84	2,5
2	5	321,8+3308j / 163+982j	159,1	162,7	0,097	10,68	2,5

Сводка параметров исследования ЭМВ бокового типа при высоте индуктора 0,26 м

Таблица 5.

Число пар полюсов	Частота, Гц	Мощность (полная/эл.магн), кВА	Потери в индукторе, кВт	Мощность во ВЭ, кВт	cosφ	Суммарное тяговое усилие, кН	Макс. скорость м/с
1	5	1208+15520j/390,8+1254j	817,3	390,8	0,078	12,8	2
2	5	548,4+4061j/ 188,5+923,8j	362,2	188,5	0,134	13,23	2
3	5	384,1+2667j / 89+911j	295,1	89	0,143	8,676	1,5
4	5	265,6+1827j / 30,5+730,2j	235,1	30,5	0,144	3,929	1

Результаты расчетов показывают, что использование схем с числом пар полюсов $p=1$ и $p=2$ эффективнее при низких частотах, т.к. в этих случаях наблюдаются максимальные скорости и суммарные тяговые усилия в расплаве.

Проведен анализ теплового состояния ЭМВ при различных режимах работы с помощью метода детализированных ЭТС – режим отключенного состояния,

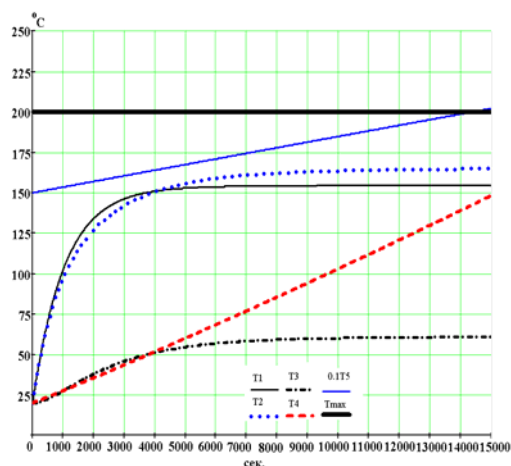


Рис. 19

форсированные режимы работы с интенсивным охлаждением обмотки и магнитопровода ЭМВ, номинальный режим работы с применением новейших материалов (рис. 19), где T_1 – температура лобовой части обмотки, T_2 – температура пазовой части обмотки, T_3 – температура магнитопровода, T_4 – температура футеровки, T_5 – температура ВЭ, T_{max} – предельная температура. Результаты показывают, что даже в режиме отключенного состояния индуктора происходит нагрев футеровки со стороны нагретого ВЭ в тигле.

Проведен сравнительный анализ использования бокового и торцевого ЭМВ, даны рекомендации по выбору ЭМВ при различном заполнении тигля расплавом. При неизменных параметрах питания индуктора, но с различной высотой металла в тигле можно выделить 2 варианта – с полным заполнением тигля (высота металла 1 м) и с заполнением тигля до отметки 0,3 м. При заполнении металлом тигля на 0,3 м более эффективно применение торцевого ЭМВ ввиду большей активной поверхности и меньшими требуемыми усилиями. При высоте металла 1 м высота бокового индуктора равна 1 м, геометрия торцевого ЭМВ не изменится, более выгодно использование бокового ЭМВ, поскольку увеличивается активная поверхность индуктора и удельные усилия, действующие на расплав, гораздо больше, чем в варианте с торцевым ЭМВ. Высота лунки достигает большего значения.

Рассмотрены варианты компенсации реактивной мощности: традиционная поперечная компенсация и внутренняя компенсация, когда параллельные ветви компенсационной обмотки оказываются пространственно сдвинутыми относительно фаз основной (силовой - СО) обмотки на 30° . Фазы компенсационной обмотки (КО) включаются последовательно с конденсаторами в многофазную цепь по схеме поворотного трансформатора с изменением начал и концов по сравнению с СО. Результаты расчетов показывают увеличение тяговых усилий на 6% при использовании внутренней компенсации реактивной мощности.

Индукционный перемешиватель с учетом особенностей эксплуатации и монтажа всей конструкции предполагается выполнить в виде отдельных модулей (линейных МГД-устройств), число которых кратно трем. Размещенный под днищем торцевой ЭМВ более выгоден тогда, когда высота расплава в активной зоне мала и не перекрывает высоту бокового индуктора.

Следует учитывать все факторы, которые влияют на выбор конкретного вида ЭМВ. Для достижения лучших показателей плавильного комплекса возможна комбинация двух видов ЭМВ в одном ПА.

В приложениях приводятся документы о внедрении, формуляры MathCAD-программ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой развитие разработок коллектива кафедры ЭЭС УГТУ-УПИ в области исследования взаимосвязан-

ных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в МГД-устройствах специального назначения - ЭМВ. Основные результаты могут быть выражены в следующем:

1. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать процессы в жидкометаллическом ВЭ с учетом присущих ему особенностей, состоящая из трех основных взаимосвязанных элементов (подмоделей):

- модель электромагнитных процессов на основе метода детализированных схем замещения, при этом адаптирован метод ДСЗ для уточненного расчета параметров ЛИМ с кольцевыми катушками;
- гидродинамическая модель, позволяющая производить расчет скорости движения расплава в ванне ПА в двумерной постановке, и скорость разгона ВЭ до необходимой скорости в одномерной постановке;
- тепловая модель, учитывающая особенности конструкции и тепловых процессов, основанная на детализированных эквивалентных тепловых схемах замещения.

2. Математическая модель ЭМВ на основе ДСЗ и МКР реализована в виде быстродействующих алгоритмов и программ в среде MathCAD.

3. Произведено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными, а также с результатами расчета полевыми методами, которое подтверждает достоверность выполненных исследований и показывает, что допущения, принятые при разработке моделей, приемлемы для получения достаточной для инженерной практики точности.

4. На основе созданной математической модели произведены исследования электромагнитных, гидромеханических и тепловых процессов в ЭМВ и его лабораторных моделях.

Подробно изучены особенности гидромеханических процессов в расплаве ЭМВ. Рассмотрено влияние на скорость расплава и удельные усилия в расплаве ПА различных схем соединения обмоток ЭМВ на различных частотах питающего напряжения.

Проведен анализ теплового состояния и способов охлаждения торцевого ЭМВ в различных режимах работы.

5. Изготовлены уменьшенные физические модели торцевого ЭМВ в двух исполнениях: с кольцевыми и барабанными обмотками.

6. Даны рекомендации к разработке и техническим решениям основных конструктивных элементов ЭМВ, в частности, по выбору частоты питающего тока, выбору типа вращателя, числу пар полюсов индуктора, выбору схем соединения обмотки индуктора в зависимости от требований по создаваемому усилию и активной мощности во ВЭ, выбору типа охлаждения и влияния толщины футеровки.

7. Результаты исследований переданы ЗАО «РЭЛТЕК» и используются им при разработке и проектировании современных ПА на основе ИТП. Математические модели, программы и лабораторные модели используются в учебном процессе и научных исследованиях кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ.

Автор выражает благодарность доценту Сарапулову С.Ф. за помощь в подготовке материалов и написании диссертационной работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Многофункциональный плавильный агрегат для мини-металлургических предприятий / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.С. Третьяков, В.Э. Фризен, А.А.Идиятулин, С.М. Фаткуллин, А.Ю. Петров, В.И. Лузгин, Е.А. Коршунов, В.Л. Бастриков // «Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.7-11.
2. Моделирование электромагнитного вращателя металлического расплава / С.Ф. Сарапулов, А.А. Идиятулин // «Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.11-14.
3. Моделирование торцевого индукционного вращателя металлического расплава/ Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, А.А. Идиятулин, С.М. Фаткуллин // «Электротехника», 2009. №7. - С.38-43.
4. Badania wielofunkcyjnego mieszadła elektromagnetycznego / Siergiej F.Sarapulo, Piotr Szymczak, Marcin Wardach, **Aleksey A. Idiyatulin** // Materiały konferencyjne «VI Lubuska konferencja naukowo-techniczna Innowacyjne Materiały I Technologie w Elektrotechnice – i-MITEL 2010», Przylęsko k. Gorzowa Wielkopolskiego, 2010. P.159-167.
5. Simulation of the Multifunctional Melting Unit / Salavat M. Fatkullin, Sergey F. Sarapulov, Fiodor N. Sarapulov, **Aleksey A. Idiyatulin**// PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES, IFOST – 2008. Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) - Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). June 23-29, 2008. - P.425-428.
6. Формирование энергоэффективных режимов работы многофункционального плавильного агрегата / С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин**, С.М. Фаткуллин, С.В. Федонов// Сборник докладов российско-британского семинара молодых ученых и студентов «ЭКОТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА: ЭКОТЕХ – XXI» Проект Британского Совета. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007. - С. 63-68.
7. Формирование гидродинамических процессов в расплаве плавильного агрегата / В.А.Дмитриевский, Ф.Н.Сарапулов, **А.А. Идиятулин** // Материалы 14-ой Международной плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, Плес, Россия, 7 - 10 сентября 2010. - С. 206-209.
8. Особенности компенсации реактивной мощности в индукционной магнито-гидродинамической машине / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин** // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». Севастополь, 2010. - С. 68-69.
9. Linear inductor with circular winding parameters calculation features / F.N. Sarapulov, S.F. Sarapulov, **A.A. Idiyatulin** // Труды XIII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты -МКЭЭ - 2010». Крым, Алушта, 2010. - С. 122.

10. Разработка макетного образца электромагнитного вращателя металлического расплава / С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин**, С.М. Фаткуллин // Труды 12 Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты - МКЭЭ - 2008». Алушта, 2008. - С. 160.
11. Исследование лабораторной модели электромагнитного вращателя металлического расплава / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин**, С.М. Фаткуллин // Материалы III Международной НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - С.251-254.
12. Физическая модель электромагнитного вращателя металлического расплава / С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин**, С.М. Фаткуллин // Материалы III Международной НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - С.278-281.
13. Исследование циркуляции расплава в экспериментальной модели МПА / С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин** // Материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ». Новосибирск: НГТУ, 2009. - С.276-281.
14. Расчет параметров кольцевых обмоток электрических машин специального назначения / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин** // Сборник научных трудов I Межвузовской научно-практической конференции «Автоматизированные информационные и электроэнергетические системы». Краснодар: КубГТУ, 2010. С.14-17.
15. Поле скоростей в расплаве МПА / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин**, С.М. Фаткуллин // Материалы III Всероссийской научно-технической «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике». Пермь: ПГТУ, 2009. - С. 170-180.
16. Экспериментальная модель электромагнитного вращателя металлического расплава / С.Ф. Сарапулов, **А.А. Идиятулин** // Сборник статей Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2009). Новосибирск: НГТУ, 2009. - С. 213-215.

Подписано в печать 25.10.2010
Офсетная печать

Формат 60 х 84 1/16
Тираж 120

Бумага писчая
Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19